

論文 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法で補強された RC 床版の疲労耐久性

前田敏也^{*1}・小牧秀之^{*2}・上東 泰^{*3}・松井繁之^{*4}

要旨：コンクリート構造物の補強工法として、軽量のため施工が簡便で高耐久等の特徴を持つ炭素繊維シート（以下、CFS）接着工法が、RC 床版の疲労耐久性を向上させる目的で用いられている。しかし、CFS による RC 床版の補強は、鋼板接着工法に比べて経済性に劣る点や、劣化が進行した床版では効果が期待できないといった危惧がある。本研究では、このような問題に対し、CFS とコンクリートとの間に柔軟性の緩衝材を設置して疲労載荷試験を行った。その結果、緩衝材の効果により、少ない CFS 量で疲労耐久性が確保され、さらに、劣化が進行した床版でも補強効果が期待できることを確認した。

キーワード：RC 床版，疲労，炭素繊維シート，緩衝材，付着

1. はじめに

炭素繊維シート（以下、CFS）は、軽量、高強度、高耐久、施工が容易である等の特性を持っていることから、耐震補強をはじめとする各種構造物の補修・補強に広く用いられている。特に、疲労により劣化を生じる道路橋の RC 床版では、交通を遮断せずに補強が可能な、床版下面からの接着工法は効果的であり、CFS 接着工法に関する指針等も整備されている¹⁾。しかし、CFS 接着工法は、同じ疲労耐久性を確保する場合、鋼板接着工法に比べて経済性に劣る点が指摘されている。また、土木学会では RC 床版の補強への CFS の適用範囲を二方向ひび割れが発生する進展期までとしており、ひび割れが網細化して角落ちが生じるような加速期への適用を示していない²⁾。

本研究では、このような CFS の問題を解決するため、梁の曲げ補強において効果が確認されている、緩衝材を用いた CFS 接着

工法³⁾の RC 床版の疲労耐久性向上への適用性について、輪荷重疲労載荷試験により検討を行った。

2. 載荷試験

疲労載荷試験に用いた試験体の形状および主な材料の物性を図 - 1，表 - 1 にそれぞれ示す。試験体は、幅（橋軸直角方向）2m，長さ（橋軸方向）3m，厚さ 18cm の RC 床版であり、橋軸直角方向の端部にはハンチを設けた。鉄筋として D16(SD295)を橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ 125mm，100mm 間隔で配置し、圧縮側は 2 倍の間隔とした。床版下面の CFS を接着する面は、ディスクサンダーで研磨した後、プライマーを塗布した。プライマー硬化後、緩衝材を 0.5mm の厚さとなるように重量管理により塗布し、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて目付 400g/m² の高強度タイプ CFS を橋軸および橋軸直角方向にそれぞれ 1 層ずつ接

*1 清水建設(株)土木事業本部 工博（正会員）

*2 新日本石油(株)中央技術研究所 工修（正会員）

*3 日本道路公団試験研究所（正会員）

*4 大阪大学大学院工学研究科 工博（正会員）

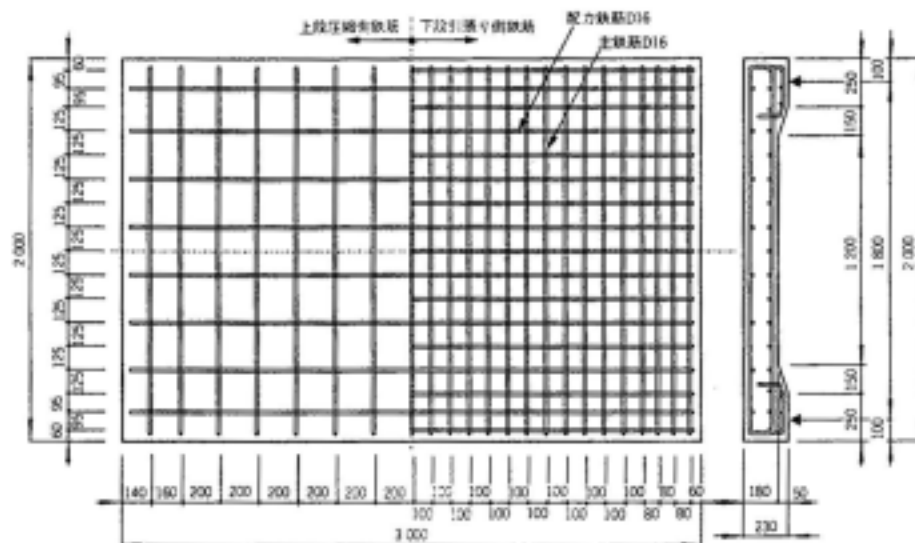


図 - 1 試験体の概要

表 - 1 使用材料の力学特性

材料	材質・物性	
CFS (400g/m ²)	引張強度	3,400N/mm ²
	引張弾性率	2.30×10^5 N/mm ²
緩衝材 (柔軟性エ ポキシ樹脂)	引張強度	1.7 N/mm ²
	引張弾性率	1.0N/mm ²
	せん断弾性率	1.0N/mm ²
	伸び率	123%
鉄筋	D16 (SD295)	
コンクリート	圧縮強度	31.4 N/mm ² (28 日)

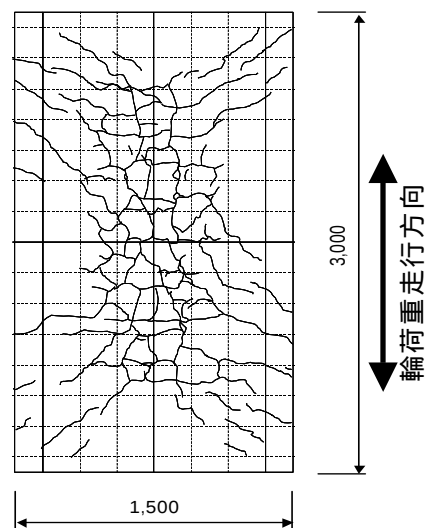


図 - 2 ひび割れ発生状況

着した。CFS の接着範囲は、橋軸直角方向はハンチ下端まで、橋軸方向はハンチ上端までとした。試験体は 2 体とし、1 体は初期損傷がないもの、もう 1 体は CFS 補強前に、劣化状態の加速期に相当する初期損傷を発生させたものである。初期損傷は、荷重 180kN で 5 万回走行させて図 - 2 に示すようなひび割れを発生させた。輪荷重走行位置でのひび割れ密度は 7.25m/m^2 であり、一部のひび割れには角落ちが生じていた。なお、初期損傷を発生させた床版の補強は、プライマー塗布後パテで不陸修正を行い、

緩衝材塗布、CFS 接着を行った。

試験体の支持は、橋軸方向の 2 辺を単純支持、橋軸直角方向の 2 辺を横桁による弾性支持とした。載荷は、まず、荷重 150kN で 10 万回慣らし走行を行った後、荷重 180kN で 70 万回走行し、この時点で破壊しない場合には荷重 210kN でさらに 20 万回走行を行った。繰返し載荷の各段階において、床版のたわみ、鉄筋および CFS のひずみを計測するとともに、コンクリートのひび割れや CFS の付着状況を目視や打音で観察した。図 - 3 に計測位置を示す。

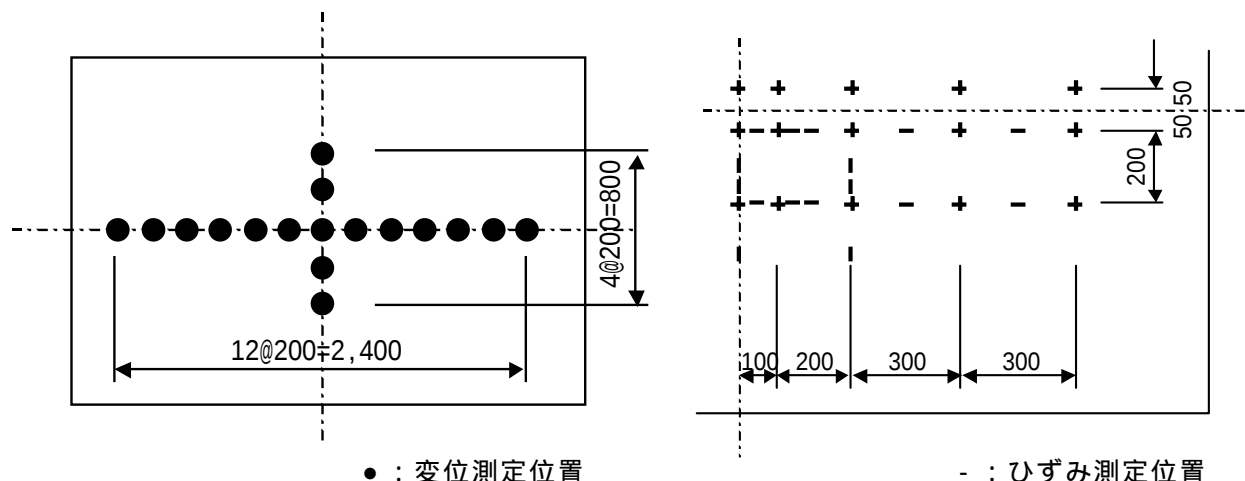


図 - 3 計測位置

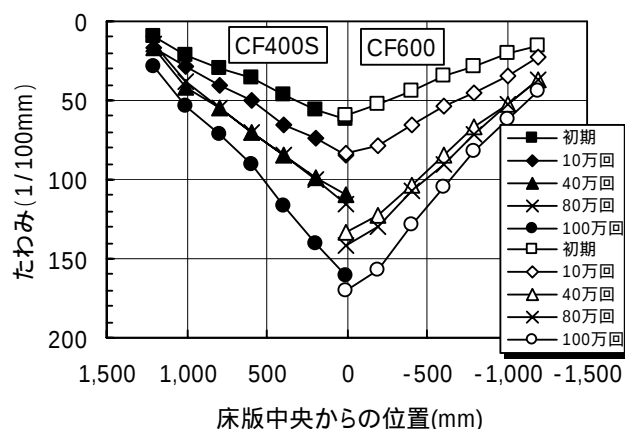


図 - 4 たわみ分布の変化

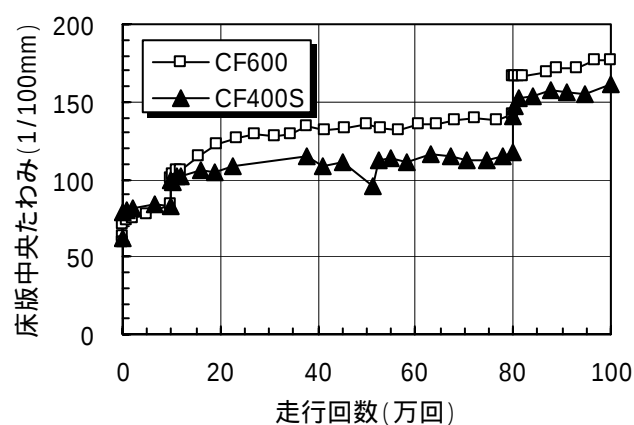


図 - 5 中央たわみの変化

3. 試験結果および考察

3.1 CFS の補強量

(1) 床版のたわみ

図 - 4 に活荷重静的載荷による橋軸方向のたわみ分布の変化を示す。初期損傷のない試験体(CF400S)は 100 万回走行後も破壊せず、CFS のはく離も認められなかった。図には比較のため、別途行われた標準工法で補強した初期損傷のない試験体(CF600)の結果⁴⁾も併記する。ここで、標準工法とは、緩衝材を用いずに目付 600g/ m² 相当の高強度タイプ CFS を二方向に接着したものであり¹⁾、CFS の強度および弾性率は 400g/ m² と同等、コンクリート強度は 33.2N/mm²

(28 日) である。これらの結果から、100 万回走行後のたわみに大きな差は見られず、緩衝材を用いることにより、標準工法の 2/3 の CFS 量で同等の疲労耐久性を有していると考えられる。また、図 - 5 に中央たわみの変化を示す。緩衝材を用いた CF400S は、走行回数の増加によるたわみの増大が標準工法である CF600 に比べて小さく、疲労による剛性の低下が小さいものと考えられる。

(2) CFS のひずみ

図 - 6 に荷重 180kN 時の活荷重静的載荷による橋軸方向の CFS のひずみ分布を示す。緩衝材を用いた CF400S のひずみ発生範囲は床版中央から約 800mm であり、標準工法

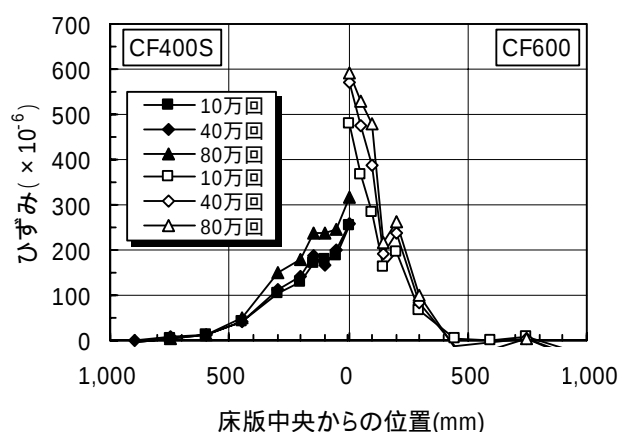


図 - 6 CFS ひずみの変化

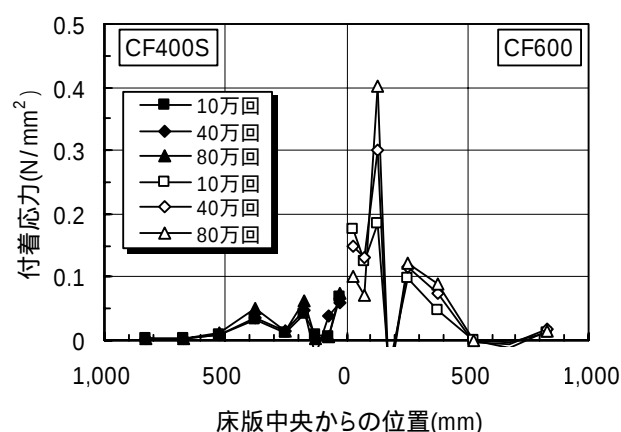


図 - 7 CFS 付着応力の変化

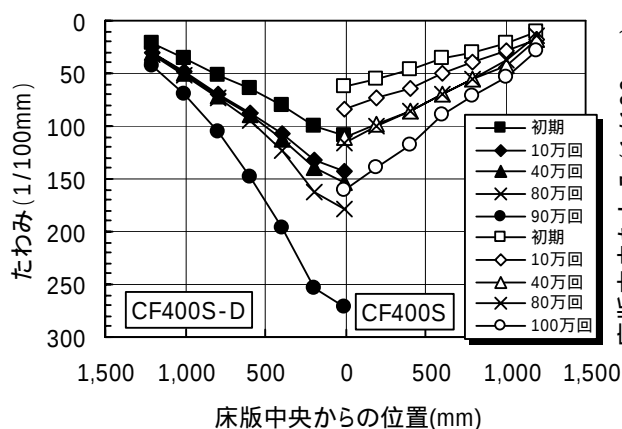


図 - 8 たわみ分布の変化

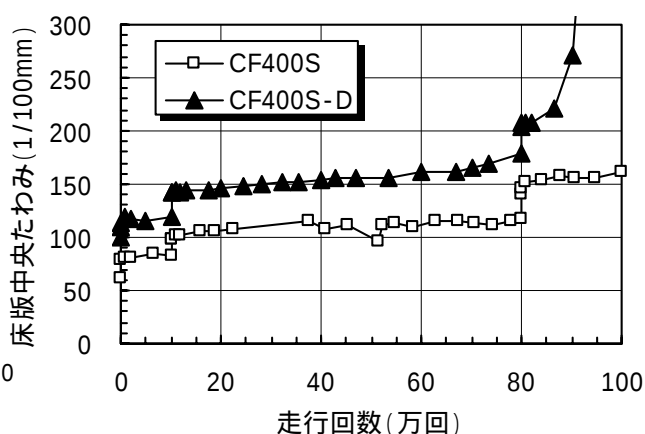


図 - 9 中央たわみの変化

である CF600 の約 2 倍となっている。このため、CFS の剛性が CF600 の 2/3 であるにもかかわらず、最大ひずみは CF600 の約 1/2 となっている。また、走行回数の増加によるひずみの増大も小さく、安定した挙動を示していると考えられる。図 - 7 に CFS のひずみから式(1)によって算出した平均付着応力の分布を示す。

$$\tau_i = \frac{E_{CFS}(\varepsilon_i - \varepsilon_j) \cdot t}{\ell} \quad (1)$$

ここに、 τ_i : i 点と j 点区間における平均付着応力(N/mm²)、 E_{CFS} : 炭素繊維シートの弾性係数(N/mm²)、 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$: i 点と j 点における

炭素繊維シートのひずみ、 t : 炭素繊維シートの厚さ(mm)、 ℓ : i 点と j 点の距離(mm)

緩衝材を用いた CF400S では、ひずみ勾配が緩やかであるために付着応力が全体的に小さく、局部的な応力集中もみられない。また、標準工法である CF600 では、床版中央近傍で走行回数の増加に伴って付着応力が若干低下しているが、CF400S では付着応力の低下がみられず、付着劣化に対する抵抗性が高いものと考えられる。同様の傾向は、梁の疲労試験でも確認されている⁵⁾。

3.2 劣化床版への適用

(1) 床版のたわみ

図 - 8 に初期損傷を導入した試験体

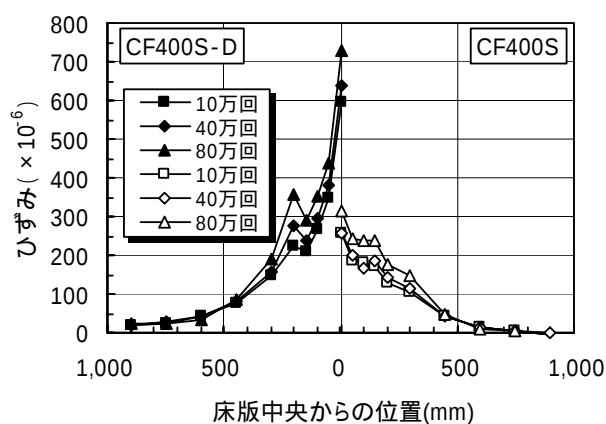


図 - 10 CFS ひずみの変化

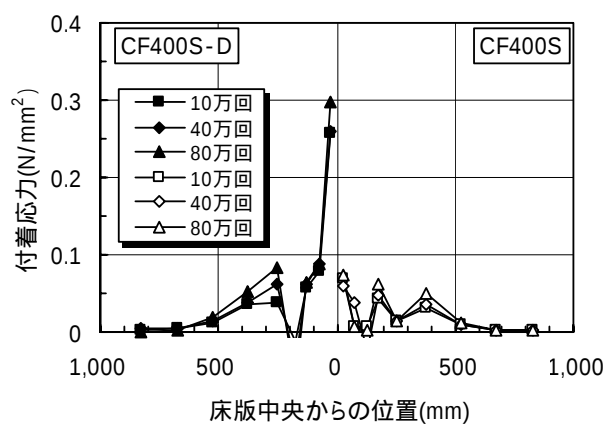


図 - 11 CFS 付着応力の変化

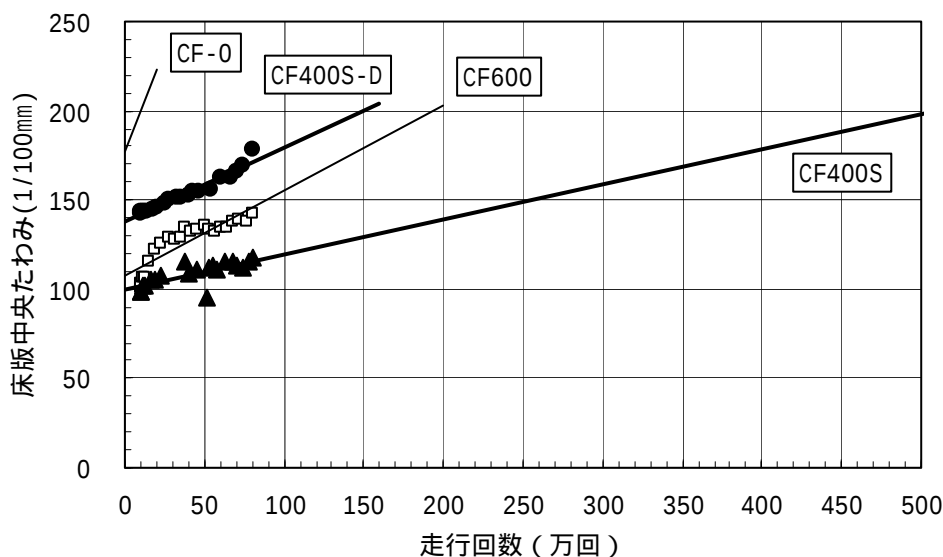


図 - 12 疲労寿命の推定結果

(CF400S-D)の活荷重静的載荷による橋軸方向のたわみ分布の変化を、図 - 9 に中央たわみの変化をそれぞれ示す。初期損傷のないCF400Sと比較すると、初期ひび割れの影響で全体的にたわみは大きく、80万回以降中央部のたわみが大きくなっているが、180kNではたわみの急激な増大はみられず、床版としての耐力は確保されているが、210kNの92万回でたわみが大きくなり試験を終了した。

(2) CFS のひずみ

図 - 10 に荷重 180kN 時の活荷重静的載荷

による橋軸方向の CFS のひずみ分布を、図 - 11 にひずみから算出した平均付着応力の分布をそれぞれ示す。初期ひび割れの影響で CF400S に比べてひずみおよびひずみ勾配は大きくなっているが、緩衝材の効果によってひずみが中央から約 1,000mm の広い範囲に分散されており、分布形状の大きな変化もみられない。また、ひずみ勾配が大きいために付着応力も大きいが、局部的な付着劣化は生じていないと考えられる。

3.3 疲労寿命の推定

載荷試験結果から疲労寿命の推定を行っ

表 - 2 疲労寿命の推定結果

試験体	疲労寿命 (万回)	CFS の剛性 ($\times 10^4 \text{N/mm}$)	CFS の種類 層数(1方向)	備考
CF0*	20	-----	-----	無補強
CF600	194	7.68	高強度 600 g/m ² $\times$ 1 層	初期ひび割れ無し
CF400S	509	5.12	高強度 400 g/m ² $\times$ 1 層	初期ひび割れ無し 緩衝材有り
CF400S-D	151	5.12	高強度 400 g/m ² $\times$ 1 層	初期ひび割れ有り 緩衝材有り

備考) * : CF0 は参考文献 6)の試験結果で疲労寿命はたわみ急増時点での走行回数

た。過去に行われた同様の試験結果では、床版の中央たわみが 2.0～2.2mm に達した時点で急激にたわみが増大して破壊する傾向にあるため、荷重 180kN で走行を続けた場合のたわみの変化を最小自乗法で近似し、たわみが 2mm となる走行回数を疲労寿命と定義している⁶⁾。

図 - 12 および表 - 2 に疲労寿命の推定結果を示す。疲労寿命は、無補強で 20 万回であるが、CFS を接着することによって向上している。初期損傷のない CF600 と CF400S を比較すると、CF400S は緩衝材の効果によってたわみの増大が緩やかであり、疲労寿命も CF600 と同等以上と考えられる。また、劣化状態の加速期に相当する初期損傷を導入した CF400S-D は、初期ひび割れの影響で全体的にたわみは大きい、たわみが増大する勾配は CF600 よりも小さく、疲労寿命も 150 万回と推定され、緩衝材の効果によって劣化が進行した床版に対しても、少ない CFS 量で疲労耐久性が確保できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見をまとめると以下のようである。

- (1) 緩衝材の効果によって標準工法の 2/3 の CFS で同等の疲労耐久性が確保できる。
- (2) 緩衝材の効果によって CFS の付着劣化

に対する抵抗性が高くなり、床版の剛性低下が小さく、疲労寿命が延びる。

- (3) 緩衝材の効果によって劣化が進行した床版に対しても少ない CFS で疲労耐久性の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所,炭素繊維補修・補強工法技術研究会:炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案),1999
- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編],2001.1
- 3) 前田敏也,小牧秀之,坪内賢太郎,村上かおり:緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果,コンクリート工学年次論文集,Vol.23,No.1,pp.817-822,2001
- 4) 岸本真輝,松井繁之:目付量の大きい CFS で補強した床版の疲労耐久性の検討,平成 13 年度関西支部年次学術講演会講演概要 -23,2001.6
- 5) 佐藤靖彦,伊藤智之,小牧秀之,前田敏也:緩衝材を用いた炭素繊維シート補強 RC はりの曲げ挙動,コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.2,pp.1375-1380,2002
- 6) 星島時太郎,太田黒博文,坂井広道,松井繁之:損傷した道路橋床版の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究,橋梁と基礎 98-9,pp.23-28,1998.9